

ナノサイズのラマン分光器が約束する鮮やかな未来

ダニエル・ラウリオラ

分光器が小型化する近年のイノベーションによって、新しいウェアラブルデバイスのアプリケーションが解放される。

分光器は1814年に発明されて以来、あらゆる光学測定と特性評価のバックボーンとなっている。食品の安全性、農業、天体物理学、宇宙探査、環境モニタリング、臨床診断、医薬品開発など、多くの分野で使用されている。

時とともに、光学分光計のデザインは大きく向上している。相補型金属酸化膜半導体(CMOS)技術により、驚異的なスペクトル範囲と、1MHzという分解能に達成できている。かつての原始的な分光器はハイクオリティ機器に変化したが、基本的なアーキテクチャはほんの数年前まで大きく変わっていなかった。現在、先進的で極めてコンパクトな分光器が開発されたことで、新しいアプリケーションの兆しが見えている。

今後10年以内に主な市場が発展するかどうかは、コンパクトでハイクオリティな分光器の製造能力に大きく関わってくるだろう(図1)。市場の発展は、従来の分光器を用いては実現できないことであり、極めて小型なポータブルデバイスが必要となる。

新しい設計やイノベーションは、従来のサイズや携帯性の限界を克服し、ミクロンサイズの分光デバイスの構築が可能になることを示している。これらの小型デバイスは、最新のエレクトロニクスや検出器と組み合わせることで、近い将来において、実証されたコスト効率のよい方法で実現されると期待がかかっている。統合型分光デバイスは、事象やプロセスに関する知識を広げ、誰もが極めて低コストで利用で

きるようになり、多くの新しくエキサイティングな分光器アプリケーションの扉を開くだろう。

仏テマティス(Tematys)による2021年の市場分析の中では、「小型分光器を開発する最初の目的は、ラボでの測定を現場や加工ラインに持ち込むことだった」と述べられている⁽¹⁾。

この目的は、光学特性評価や薬剤学、バイオテクノロジーにおける分光器の使用を増加させただけでなく、精密農業やリサイクル、プロセスコントロールなどの新しい分野にも分光器が導入されることになった。

分光器全体の市場は、2021年に110億4000万ドルで、2030年まで平均5.9%の年平均成長率(CAGR)で増加すると予測されている⁽²⁾。

テマティスによる2024年までの特定小型分光器市場(ミニ、マイクロ、チップサイズ)の予測では、最大111%

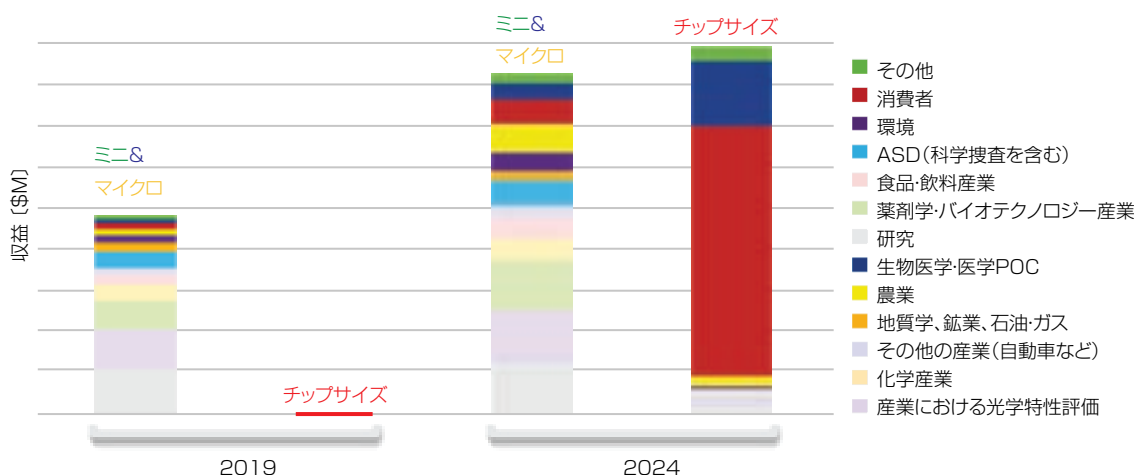


図1 2024年までの小型分光器の市場予測と、影響を受ける主な市場⁽¹⁾

のCAGRを見込んでいる。この成長の多くは、現在主に研究ベースのアプリケーションで使用されている分光器が、化学や薬剤、化学物質検出、食品・飲料の品質管理における光学特性評価と同様に、消費者や生物医学製品に広く応用されるようになるものと予想されている。ウェアラブル、ヘルスマニタリング、インプラントの市場は、新たな機会を創出するために重量とフォームファクタが不可欠であるため、小型分光器によって大きな影響を受けることになるだろう。

分光器の制限

標準的な分光器は実験室や研究施設で広く利用されており、非常に高い精度や感度に達しているが、現場での使用となると課題が残されている。十分な解像度を得るためには、光を分散させるための空間が必要となり、光学部品の大型化、重量の増加、全体的な設置面積の増大につながる。これらの理由によって、現場で使うには巨大なものになってしまう。

こうした分光器は、研究や大規模施設では長期的に使われる静的な機器として利用されているが、急速に拡大するウェアラブルデバイスやポータブルデバイスの市場の要件に対応できない。さらに、レーザーやエレクトロニクス、特定の分光測定に必要なインタフェースなどが加わると、サイズや重量はすぐに過大なものになってしまう。

真にポータブルな分光器

標準的な分光器は多くのアプリケーションで重要な役割を担っている。その一方で、米ベイスペック社(Bay Spec)は、テレコムや卓上の分光器に関する豊富な専門技術を応用し、非常に小さな設置面積に収まる新しいデバ

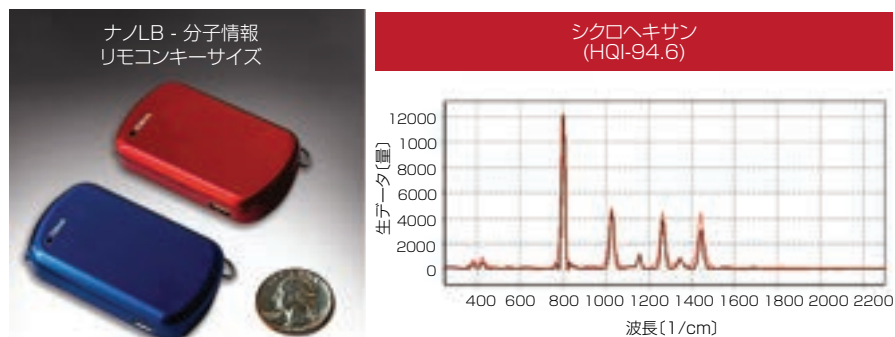


図2 (左)2つのナノLBラマン分光器。スケールとして置いたのは25セント硬貨。(右)ナノLBラマン分光器を用いたシクロヘキサンの自動検出、フィッティング、ラベリング

イス・分光器を設計している。

ウェアラブルアプリケーションに使用する小型分光器を構築するには、重要なイノベーションが要求される。標準的な20インチ(50cm)程度の分光器ボックスから、ポケットに入ったりスマートウォッチやスマートフォンに搭載できたりするデバイスに移行する必要がある。この問題を解決しようと、さまざまな研究所で、単一ピクセルの分光器のような設計を用い、機械学習や再構築アルゴリズムを組み合わせている。しかし、この技術はエキゾチック材料を必要としており、帯域幅が狭く、動作可能な波長が制限される傾向にある。実際のデバイスに実装されるまでに数年はかかる。

分光器は過去20年の間に徐々に小型化、改良されてきた。通信用のスペクトル分析装置から始まり、次第に小さなポータブルデバイスへと移っている。現在ベイスペック社が製造する小型分光器は15グラム程度、ほぼ15×20mmサイズである。

新しく開発された分光器は軽量でコンパクトだが、有用なアプリケーションにはこれ以上のものが要求される。非常に有用で汎用性の高い現場計器の1つがラマン分光器であり、あらゆる光条件下で多数の生化学物質をリアルタイムで分析できる。現実的な応用に向

けては、完全なラマン測定デバイスに必要なレーザー、検出器、エレクトロニクス、処理能力、インタフェースを分光器と組み合わせなければならない。

このような小型装置を実現するために、ベイスペック社は光学的な小型化だけでなく、システム全体の最適化と統合を重視した多面的なアプローチを採用した。同社CEOのウィリアム・ヤン氏(William Yang)は、「エレクトロニクスチームは、非常に低い消費電力でコンパクトなデバイスを実現するうえで、特に貴重な存在だった」と述べている。Bluetooth接続も各デバイスに統合されており、モバイルデバイス上でデータやスペクトルを簡単に中継できる。

これらの要素をラマン装置として組み合わせることで、車のリモコンキーほどのサイズで約59グラムの装置となり、指紋領域(450~2300cm⁻¹)内のあらゆる分子を検出できる。これは、市場で最も小型・軽量のラマン分光器だ。

図2に示すように、我々の分光器は非常にコンパクトで、用途に応じて異なる励起波長で製造することが可能である。1秒間に1回の計測を行い、さまざまなパッケージング・ソリューションに組み込むことができる。一般に、波長の長いレーザーは生物医学アプリケーションで有用で、波長の短いレーザー

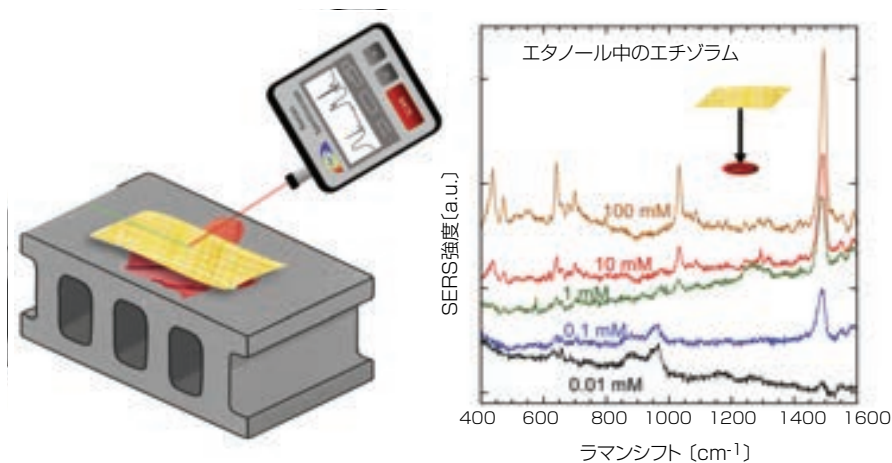


図3 左)感度向上を目指したSERSのコンセプト。(右) SERSを用いた微量濃度の違法薬物エチゾラムの検出(参考文献3より転載)

は化学兵器や生物兵器などの検出に最適である。

驚くべき用途

携帯型ラマン分光器の用途は、化学物質の検出、違法薬物の検査、食品や医薬品の品質管理、個人のヘルスマニタリング、農薬の検出、尿測定、多くの生物医学アプリケーションと、多岐にわたる。

こうした用途をカバーするため、顧客のニーズに応じて再パッケージやカスタマイズがしばしば行われるが、その際に驚くべき意外な用途が生まれることもある。

そうしたデバイス用途として、ジェームズ・ボンド (James Bond) の映画を彷彿とさせるものがあった。ベイスベック社は、車のリモコンキーと同じ形状とサイズのデバイスを作るよう依頼された。そのデバイスは、ものの表面やエリアが危険な化学物質で汚染されているか、違法薬物の痕跡があるかを確認するため、法執行機関が使用できたという。

デバイスのもう1つの大きな市場に、オーガニックフルーツの再販がある。最終製品に農薬が含まれていないかの

確認が重要だからだ。特に、大型機器を購入する余裕や設置するスペースがない小規模な店舗や再販先では、小型のポータブルデバイスが必要不可欠である。大型店舗でも、小型デバイスの精度は卓上型の大型デバイスに匹敵しており、品質管理プロセスを大幅に効率ができることがわかってきている。

最も一般的な用途は、警察による有害な化学物質の検出、医薬品や食品・農産物の品質管理などである。

近年では、感染症の伝播、細菌、エアロゾルの環境中の連続モニタリングが盛んに行われている。しかし、危険な状態になる前に微量を検出することは困難なままである。

これを克服するために、ベイスベック社が開発した表面増強ラマン分光法 (SERS) センサは、あらゆる表面に設置できる厚さ2~10 μ mの接着性のあ

る基板に、ナノラマン分光器を結合させる (図3)。この薄膜は、共鳴によってラマン信号が増強されるように慎重に配置された金ナノメッシュ構造となっており、検出が困難な化学物質やバイオマーカーなどの感度が大幅に向上している⁽³⁾。

その一例として、違法薬物であるエチゾラムを0.01mMという微量の痕跡検出がある (図3)。ポータブルSERSデバイスを、ドアノブなどのよく触れる表面に設置することで、建物内の感染症や薬物、生化学物質の存在をモニタリングできる。

ベイスベック社が採用したSERSは、研究室で化学物質を表面に慎重に蒸着させる必要がある標準的なSERSと比べ、耐久性があって簡単に適応できるナノメッシュであるため、その場での測定を可能にしている。このSERSナノメッシュは、時間の経過とともに測定分子を吸収、濃縮し、より長期的なモニタリングが可能である。

ラマンシステムをポータブルデバイスやウェアラブルデバイス、スマートフォンに大規模に搭載することはまだ難しいが、市場の準備は整っており、あらゆる種類の生化学物質のリアルタイム高感度測定が可能となることに大きな関心が寄せられている。進化する小型分光器技術と、その応用市場の拡大は、人々の生活の向上に現実的でポジティブな影響をもたらすと期待されている。

参考文献

- (1) J. Kulakowski and B. d'Humieres, "Compact Spectrometers: Technologies, Market Trends and Needs," *Photonics Views*, 1 (2021).
- (2) See www.emergenresearch.com/industry-report/spectrometry-market.
- (3) Y. Kitahama et al., *Anal. Methods*, 15,1028-1036 (2023).

著者紹介

ダニエル・ラウリオラはベイスベック社の分光器科学者。
e-mail: dlauriola@bayspec.com www.bayspec.com